

Оценка оптических свойств радиопрозрачных теплозащитных материалов волокнистой структуры

Е. П. Пахомов и В. П. Петровский

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: b1p2a3@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 июля 2023 г.

Аннотация. Анализируются условия работы антенно-фидерного оборудования современных высокоскоростных летательных аппаратов. Отмечается существенная роль излучения в тепловом балансе поверхности радиопрозрачных элементов конструкций, выполняемых из материалов на основе кремнеземистых волокон. Работа посвящена экспериментальному исследованию оптических характеристик таких материалов, а именно, спектральной зависимости нормальных отражательной и пропускательной способности пластин из кремнеземистого материала волокнистого строения и их зависимости от толщины пластин. Отмечается, что так как толщина радиопрозрачных вставок много меньше их размеров, то можно ограничиться одномерным рассмотрением переноса энергии излучения с данной длиной волны через бесконечно большую пластину, т.е. не рассматривать собственно механизмы рассеивания света и ограничиться определением только нормальных спектральных величин отражения и пропускания, что существенно упрощает задачу. В качестве первого приближения принято, что для материала из кремнеземистых волокон характер зависимости коэффициента отражения (зависящего от состояния только поверхностного слоя) и коэффициента пропускания от длины волны света определяется в первую очередь видом и строением материала и слабо зависит от температуры. При таком подходе для оценок поведения материала при высоких температурах достаточно получения спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания при нормальных условиях (без выполнения высокотемпературных исследований), что и было сделано с использованием доступных стандартных измерительных средств. <https://doi.org/10.33849/2023207>

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные высокоскоростные летательные аппараты (ЛА) оснащены разнообразным антенно-фидерным оборудованием для обеспечения надежной радиосвязи с наземными и спутниковыми станциями. Большие скорости создают высокий уровень тепловых нагрузок и тепловых ударов на радиопрозрачных элементах конструкции ЛА, что вызывает необходимость создания материалов способных сохранять радиопрозрачность при нагреве до 2000–2500 К при сохранении достаточного уровня теплозащиты [1].

Радиопрозрачные теплозащитные материалы (РТЗМ) должны обладать высокими и стабильными в широком интервале рабочих температур диэлектрическими характеристиками в сочетании с высокой термохимической стойкостью к воздействию высокотемпературных тепловых потоков.

Подобным набором свойств обладает кремнезём (SiO_2) в виде волокон диаметром 1–10 мкм [2]. Из таких волокон можно изготавливать либо материал типа ваты, либо изготавливать жгуты диаметром 0.5–1.5 мм с последующим изготовлением из них композиционных материалов класса ($\text{SiO}_2\text{--SiO}_2$) с 2D или 3D плетением и пропиткой пространства между волокнами аэрозолем кремнезёма.

2. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТЫ

В установлении теплового режима радиопрозрачной теплозащиты при температурах поверхности выше 2000 К практически определяющую роль играет излучение, что следует из анализа теплового баланса такой защиты для любого момента времени ее работы.

Плотность конвективного теплового потока в стенку равна для каждого момента времени $q(\text{конв}) = \alpha(H)[H(\text{потока}) - H(\text{стенки})] \sim 1\text{--}5 \text{ МВт/м}^2$ и задается величиной энтальпийного коэффициента теплообмена и разностью энтальпий набегающего потока и горячей стенки.

Плотность собственно кондуктивного теплового потока в стенку $q(\text{конд})$, необходимого для нестационарного разогрева стенки до реализуемой в каждый момент времени температуры поверхности (обычно около $0.5\text{--}1.5 \text{ МВт/м}^2$), определяется теплоемкостью, плотностью, теплопроводностью и толщиной материала (или материалов при многослойном исполнении) стенки.

Третий компонент теплового баланса — излучение горячей стенки во внешнюю среду — $\varepsilon\sigma T^4$, где ε — эффективная степень черноты материала поверхности стенки (интегральная излучательная способность в полусферу). Для 2000–2500 К $\sigma T^4 = 0.9\text{--}2.2 \text{ МВт/м}^2$, т.е. все три члена теплового баланса соизмеримы по величине.

Пересечение кривых $q(\text{конв}) = f(T)$ и $q(\text{ст}) = [q(\text{конд}) + \varepsilon\sigma T^4] = f(T)$ дает значение реализуемой в рассматриваемый момент времени температуры поверхности материала теплозащиты.

Видно, что величина этой температуры определяется в первую очередь величиной интегральной излучательной способности материала поверхности стенки ε . Однако, оптические свойства материалов волокнистого строения, к тому частично прозрачных, практически не известны. Поэтому возникла необходимость их оценки.

3. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНЕЗЕМИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ВОЛОКНИСТОГО СТРОЕНИЯ

Для рассматриваемой задачи теплозащиты достаточно одномерного рассмотрения (толщина покрытия много меньше ее размеров). Это означает, что можно ограничиться одномерным рассмотрением переноса энергии излучения с данной длиной волны через бесконечно большую пластину, т.е. не рассматривать собственно механизмы рассеивания света и ограничиться определением только нормальных спектральных величин отражения — $\varepsilon(\text{отраж})_\lambda$ и пропускания — $\varepsilon(\text{проп})_\lambda$, что существенно упрощает задачу. В этом случае $\varepsilon(\text{изл})_\lambda = \varepsilon(\text{погл})_\lambda = 1 - \varepsilon(\text{отраж})_\lambda - \varepsilon(\text{проп})_\lambda$.

В качестве первого приближения можно принять, что для материала из кремнеземистых волокон характер зависимости коэффициента отражения (зависящего от состояния только поверхностного слоя) и коэффициента пропускания от длины волны света определяется в первую очередь видом и строением материала и, вероятно, слабо зависят от температуры (с ростом температуры несколько растет поглощение, что подтверждают данные [2], где до 1500 К получено небольшое (до 10%) увеличение поглощения только на некоторых участках спектра).

Тогда для теплового излучения интегральные характеристики материала можно определить как $\varepsilon = \int \varepsilon I(\lambda) d\lambda / \Delta\lambda \sigma T^4$, где $I(\lambda) = (2\pi hc / \lambda^5) / [\exp(hc/kT\lambda) - 1]$ — излучение черного тела.

При таком подходе для оценок поведения материала при высоких температурах достаточно получения спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания при нормальных условиях (без выполнения высокотемпературных исследований), что и было сделано с использованием доступных стандартных измерительных средств.

Соответственно, для одномерного приближения принципиально упрощается и задача аналитического исследования переноса лучистой энергии через частично прозрачную стенку. Для этого достаточно дополнительно получить экспериментальные данные о зависимости $\varepsilon(\text{отраж})_\lambda$ и $\varepsilon(\text{проп})_\lambda$ от толщины слоя материала опять же при нормальных условиях.

3.1. Нормальная отражательная способность

На рисунке 1 приведены полученные результаты для спектральной зависимости нормального коэффициента отражения в полусферу кремнеземистого материала волокнистого (средний диаметр волокон около 6–7 мкм) строения толщиной 5 мм с двухмерным плетением жгутов (диаметр 0.5–1.5 мм) в диапазоне длин волн от 0.4 до 6.6 мкм.

Для оценки отражения в области $\lambda > 6.6$ мкм, где находится максимум теплового излучения при $T < 500$ К, были использованы измерения на Фурье-спектрометре ФТ-801 с приставкой ПРИЗ отражения под углом 45° (рисунок 1), увеличенные в 20 раз для обеспечения согласования с измерениями отражения в полусферу в области $\lambda = 0.4$ –6.6 мкм.

На рисунке приведена принятая для расчетов интегральной отражательной способности аппроксимация спектральной нормальной отражательной способности

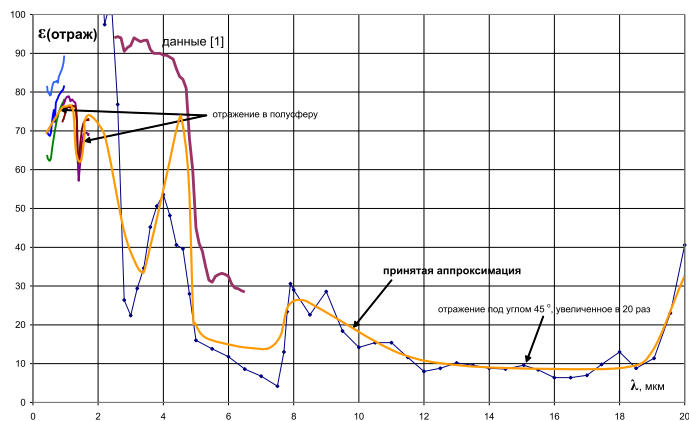


Рисунок 1. Зависимость от длины волны коэффициента отражения в полусферу кремнеземистого материала волокнистого строения с двухмерным плетением жгутов волокон. Толщина слоя материала 5 мм.

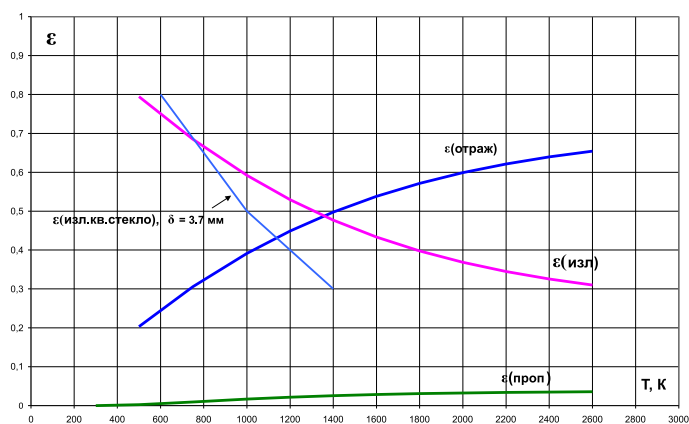


Рисунок 2. Зависимость интегральной отражательной, пропускательной и излучательной способности пластин кремнеземистых материалов волокнистого строения толщиной 5 мм от температуры.

пластин толщиной 5 мм. Сравнение полученных результатов с данными [1] для кремнеземистого материала волокнистого строения ТЗМК-10, созданного для летательного аппарата “Буран”, показало их качественное согласие (рисунок 1). Материал ТЗМК-10 имел меньший диаметр волокон (2–3 мкм) и строение типа слабоспеченной ваты.

Видно, что в области до 2.5 мкм величина отражения исследуемой волокнистой структуры составляет 70 и более процентов, в то время как такой же материал в виде кварцевого стекла отражает только 4–6%.

На рисунке 2 приведена соответствующая полученной спектральной зависимости зависимость интегральной отражательной способности рассматриваемого материала от температуры (в рамках принятых допущений).

Видно, что по мере роста температуры, ведущего к смещению максимума теплового излучения в область меньших длин волн, где велико спектральное отражение, величина интегрального отражения теплового излучения волокнистым материалом существенно растет, а величина интегральной излучательной способности, соответственно, падает.

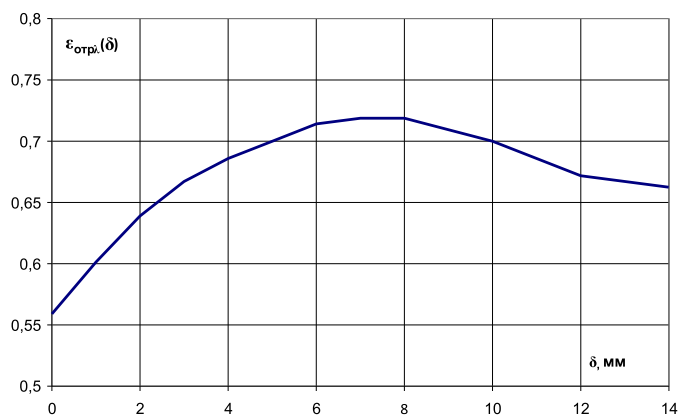


Рисунок 3. Результаты измерения относительной величины спектрального отражательного свойства пластин из материала волокнистого строения разной толщины на $\lambda = 0.53$ мкм.

В частности из полученных данных следует, что спектральная степень черноты на пирометрической длине волны ($\lambda = 0.65$ мкм) оказывается меньше 0.25, что соответствует существенному занижению измеряемой яркостной температуры от ее истинного значения (при $T_{\text{ярк}} = 2000$ К $T_{\text{ист}} > 2287$ К).

Так как в материалах волокнистого строения, к тому же частично прозрачных, нет сплошной поверхности, то отражение в них происходит в слое определенной толщины. Поэтому были выполнены измерения зависимости относительной величины отражательной способности от толщины пластин. Использовался кремневый фотодиод ФД-42К с линейной зависимостью тока от освещенности (до 1100 лк или 0.51 мА выходного сигнала). Диаметр приемного элемента ФД-42К — 10 мм. Фотодиод располагался под углом около $30\text{--}40^\circ$ к направлению луча на расстоянии около 4 см от образца, который освещался зеленым лучом ($\lambda = 0.53$ мкм) диаметром около 0.6 см (для хотя бы частичного усреднения структуры материала). Полученные результаты приведены на рисунке 3.

Видно, что действительно в отражении участвуют слои материалов вплоть до толщины около 7–15 мм. Уменьшение отражения при увеличении толщины более 7–8 мм обусловлено уменьшением вклада отражения от задней поверхности.

3.2. Нормальная пропускательная способность

Первые оценки спектральной зависимости нормальной пропускательной способности материалов волокнистого строения были выполнены с измерением энергии излучения, прошедшего в направлении падающего луча, без учета рассеянного излучения.

Грубая оценка дает, что эта величина может быть в сотни раз меньше искомой интегральной пропускательной способности в полусферу на задней поверхности образца. Эти измерения были нужны для определения вида спектральной зависимости этого параметра.

Оказалось, что эта величина имеет максимум в области $\lambda = 1\text{--}2$ мкм с величиной пропускания около 0.01–0.015%. В области длин волн от 0.4 до 0.8 мкм это

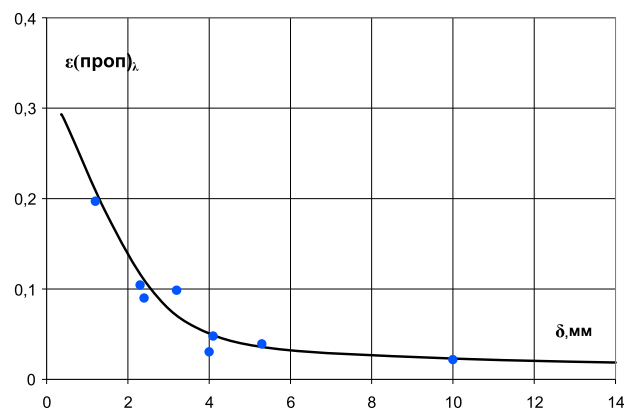


Рисунок 4. Результаты измерения спектрального пропускания пластин материала волокнистого строения разной толщины на $\lambda = 0.53$ мкм.

величина меньше 0.004%, а в остальной части спектра (от 1.5 до 20 мкм) меньше 0.001%.

При освещении поверхности пластины толщиной 5 мм из материала волокнистого строения узким ($d = 1\text{--}2$ мм) зеленым лучом ($\lambda = 0.53$ мкм) измерение зависимости сигнала фотодиода от его расстояния от задней поверхности пластины (толщиной 5 мм) дало для прижатого датчика (расстояние от чувствительного элемента до поверхности образца около 1 мм) — 0.027 мА, для расстояния от датчика до поверхности образца 1 мм — 0.023 мА, для 5 мм — 0.014 мА, для 20 мм — 0.009 мА и для 100 мм — 0.001 мА. Экстраполяция на $x = 0$ (на сбор рассеянного излучения в полусферу) дает величину около 0.031 мА при величине сигнала без образца 0.85 мА. Таким образом, величина спектрального коэффициента пропускания пластины из материала волокнистого строения толщиной 5 мм на длине волны 0.53 мкм составляет около 4%. По-видимому, эта величина определяется в первую очередь типом материала (кремнеземом) и строением образца (диаметром волокон, плетением и пропиткой) и вряд ли существенно зависит от температуры.

Результаты измерений зависимости величины нормальной пропускательной способности от толщины слоя материала на $\lambda = 0.53$ мкм приведены на рисунке 4.

Отметим наличие существенной нестабильности локальной (по площади поверхности образца) величины пропускания, обусловленной волокнистым строением материала (свет, попавший внутрь волокон-световодов, легко распространяется вдоль них) и соизмеримостью диаметра жгутов и толщины материала.

С учетом данных [1] для ТЗМК-10 принята следующая спектральная зависимость пропускательной способности пластин материала волокнистого строения толщиной 5 мм: до $\lambda = 2.5$ мкм $\varepsilon(\text{проп})_\lambda = 4\%$, далее линейное падение до нуля к $\lambda = 5$ мкм, что позволило рассчитать температурную зависимость величины интегральной пропускательной способности $\varepsilon(\text{проп})$, приведенную на рисунке 2.

Следует отметить, что сравнительно небольшая величина пропускания горячих слоев теплозащиты тем не менее оказывает весьма существенное влияние на фор-

мирование температурного режима следующего за ним слоя низкотемпературного конструкционного материала, так как небольшая величина плотности прошедшего лучистого теплового потока оказывается здесь соизмеримой с величиной плотности кондуктивного теплового потока.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты оценки оптических свойств кремнеземистых волокнистого строения материалов позволили выполнить оценки реального теплового режима работы материалов теплозащиты радиопрозрач-

ных участков поверхности высокоскоростных летательных аппаратов и открывают возможность численного исследования переноса энергии излучения в таких условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров В А 2012 *Модель Диффузии Излучения для Радиационно-Конвективного Теплопереноса в Высокотемпературных Полупрозрачных Рассеивающих Теплоизоляционных Материалах : Монография* (Москва: МГТУ МИРЭА)
2. Petrovskiy V P, Pakhomov E P, Politiko A A, Semenenko V N, Chistyayev V A, Balakirev B A, Pervov A Yu, Kamalov A D and Sotskova L P 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **946** 012032